第４講　電気回路（電磁気学）

1 （解答用紙２）

太陽電池は，光を電気に変換する素子である。ここでは，太陽電池を図１に示す記号を用いて表し，その出力電流 I は図中の矢印の向きを正とする。また，図中の端子 b を基準とした端子 a の電位を出力電圧 V とする。このとき，V と I の関係は，図２のようになり，下記の式(i)，(ii)で表されるものとする。

(i)　$V \leqq V_0$ のとき，$I = sP$

(ii)　$V > V_0$ のとき，$I = sP - \dfrac{1}{r}(V - V_0)$

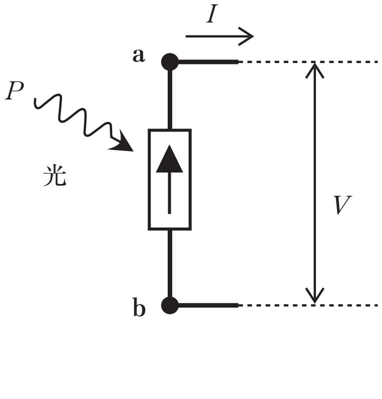
ここで，P は照射光の強度，r，s，V_0 は全て正の定数である。以下の設問に答えよ。

ただし，回路の配線に用いる導線の抵抗は無視してよい。

I　図３のように，太陽電池の端子間に電気容量 C のコンデンサーを接続した。このとき，コンデンサーに電荷は蓄えられていなかった。この状態で，時刻 $t=0$ から一定の強度 P_0 の光を照射したところ，図４のように電流 I が変化した。

(1)　図４中の時刻 t_1 を求めよ。

(2)　十分に時間が経過した後にコンデンサーに蓄えられた電荷を求めよ。



太陽電池

図１

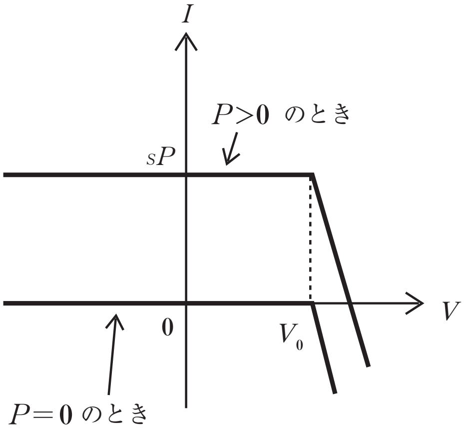


図２

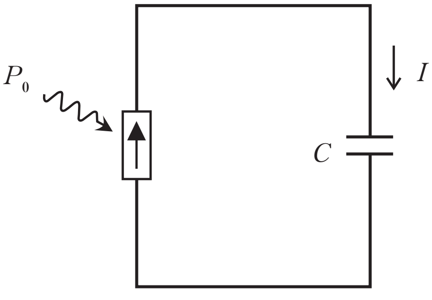


図３

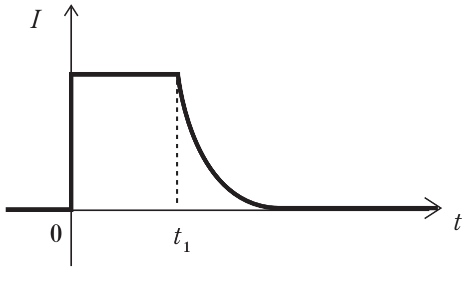


図４

＜ Note ＞

Ⅱ　図５のように，太陽電池の端子間に抵抗値 R の抵抗を接続し，強度 P_0 の光を照射した。R を変化させたとき，ある R_0 を境に，$R \leqq R_0$ の範囲では，抵抗を流れる電流 I が R によらず sP_0 となり，$R > R_0$ の範囲では，R の増加とともに電流 I が減少した。

⑴　R_0 を求めよ。

⑵　$R > R_0$ のときの電流 I を，P_0，r，s，V_0，R を用いて表せ。

⑶　r が R_0 に比べて十分小さいとき，抵抗で消費される電力が最大となる R の値と，そのときの電力を求めよ。

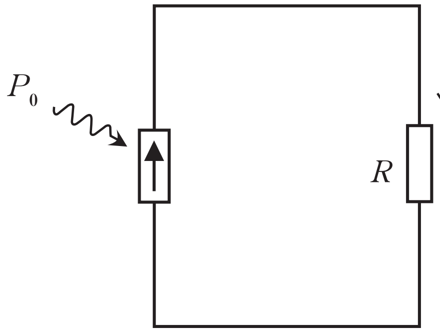


図５

Ⅲ　図６のように，二つの太陽電池１，２と抵抗値 R の抵抗を直列に接続した。太陽電池１に強度 P_0 の光を，太陽電池２に強度 $2P_0$ の光を同時に照射した。ただし，$P_0 = \dfrac{V_0}{rs}$ とする。太陽電池１，２の出力電圧をそれぞれ V_1，V_2 とし，抵抗を流れる電流を I とする。

⑴　R を調整したところ，$I = \dfrac{1}{2}sP_0$ となった。V_1，V_2 を求めよ。

⑵　⑴のとき R が r の何倍になるか答えよ。

⑶　次に，$R = r$ とした。V_1，V_2 はどのような範囲にあるか。以下から正しいものを一つ選んで答えよ。

ア．$V_1 \leqq V_0$ かつ $V_2 \leqq V_0$

イ．$V_1 \leqq V_0$ かつ $V_2 > V_0$

ウ．$V_1 > V_0$ かつ $V_2 \leqq V_0$

エ．$V_1 > V_0$ かつ $V_2 > V_0$

⑷　⑶の状態において，I，V_1，V_2 を求めよ。

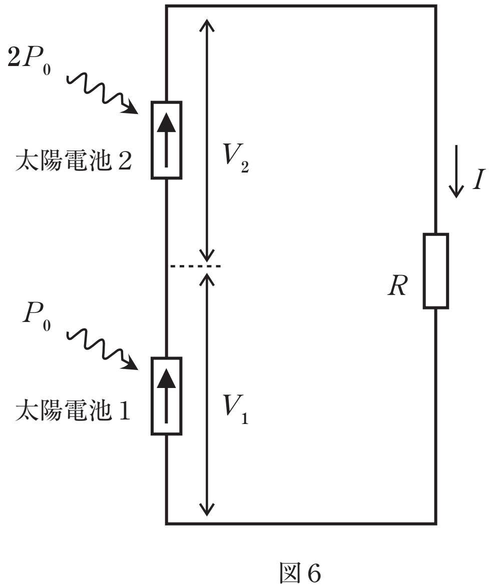


図６

＜ Note ＞

2 （解答用紙２）

電気製品によく使われているダイオードを用いた回路を考えよう。簡単化のため，ダイオードは図１のようなスイッチ S_D と抵抗とが直列につながれた回路と等価であると考え，P の電位が Q よりも高いか等しいときには S_D が閉じ，低いときには S_D が開くものとする。なお以下では，電池の内部抵抗，回路の配線に用いる導線の抵抗，回路の自己インダクタンスは考えなくてよい。

Ⅰ　図２のように，容量 C のコンデンサー２個，ダイオード D_1，D_2，スイッチ S，および起電力 V_0 の電池２個を接続した。最初，スイッチ S は $+V_0$ 側にも $-V_0$ 側にも接続されておらず, コンデンサーには電荷は蓄えられていないものとする。点 G を電位の基準点(電位 0)としたときの点 P_1，P_2 それぞれの電位を V_1，V_2 として，以下の設問に答えよ。

(1)　まず，スイッチ S を $+V_0$ 側に接続した。この直後の V_1，V_2 を求めよ。

(2)　(1)の後，回路中の電荷移動がなくなるまで待った。このときの V_1，V_2，およびコンデンサー１に蓄えられている静電エネルギー U を求めよ。また，電池がした仕事 W を求めよ。

(3)　(2)の後，スイッチ S を $-V_0$ 側に切り替えた。この直後の V_1，V_2 を求めよ。

(4)　(3)の後，回路中の電荷移動がなくなったときの V_1，V_2 を求めよ。

Ⅱ　図２の回路に多数のコンデンサーとダイオードを付け加えた図３の回路は，コッククロフト・ウォルトン回路と呼ばれ，高電圧を得る目的で使われる。いま，コンデンサーの容量は全て C とし，最初，スイッチ S は $+V_0$ 側にも $-V_0$ 側にも接続されておらず，コンデンサーには電荷は蓄えられていないとする。

スイッチ S を $+V_0$ 側，$-V_0$ 側と何度も繰り返し切り替えた結果，切り替えても回路中での電荷移動が起こらなくなった。この状況において，スイッチ S を $+V_0$ 側に接続したとき，点 P_{2n-2} と点 P_{2n-1} の電位は等しくなっていた($n=1$，2，…，N)。また，スイッチ S を $-V_0$ 側に接続したとき, 点 P_{2n-1} と点 P_{2n} の電位は等しくなっていた($n=1, 2, \cdots, N$)。スイッチ S を $+V_0$ 側に接続したときの点 P_{2N-1}, P_{2N} の電位 V_{2N-1}，V_{2N} を N と V_0 で表せ。なお，点 G を電位の基準点(電位 0)とせよ。

＜ Note ＞

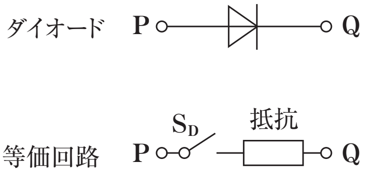

ダイオード
P
Q
S_D
抵抗
等価回路
P
Q

図１

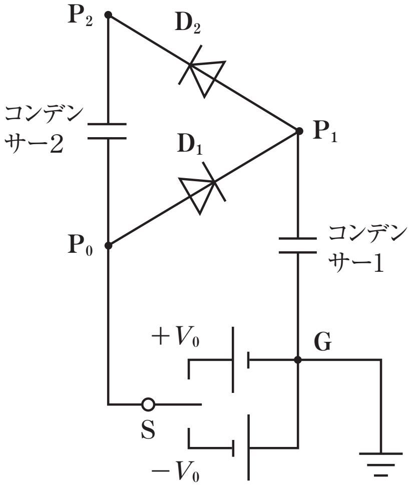

P_2
D_2
コンデンサー2
D_1
P_1
P_0
コンデンサー1
+V_0
G
S
−V_0

図２

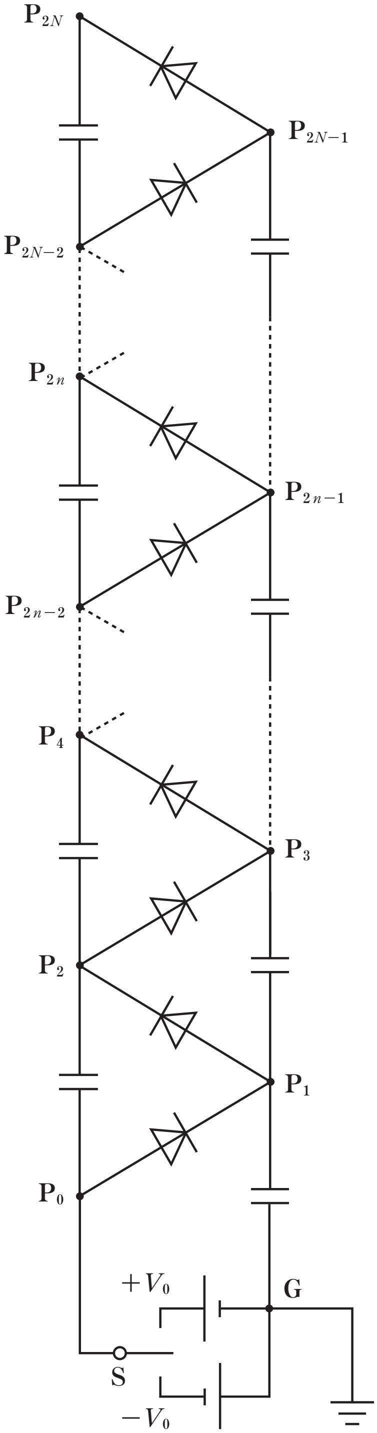

P_2N
P_2N−1
P_2N−2
P_2n
P_2n−1
P_2n−2
P_4
P_3
P_2
P_1
P_0
+V_0
G
S
−V_0

図３

＜ Note ＞

第４講　確認テスト

1 （解答用紙２）

真空放電による気体の発光を利用するネオンランプは，約 80V 以上の電圧をかけると放電し，電流が流れ点灯する。したがって，起電力が数 V の乾電池のみでネオンランプを点灯させることはできない。しかし，コイルおよびスイッチと組み合わせることにより，短時間ではあるがネオンランプを点灯させることができる。

ここでは，図１の電圧―電流特性をもつネオンランプを起電力 9.0V の乾電池で点灯させることを考える。図２のように，乾電池，コイル，およびスイッチを直列につなぎ，ネオンランプをコイルと並列につなぐ。コイルの自己インダクタンス L を 1.0H，コイルの抵抗を 35Ω，乾電池の内部抵抗を 10Ω，ネオンランプの端子 B を基準とする端子 A の電位を V_A として，以下の問に答えよ。ただし，ネオンランプに流れる電流の大きさは，端子 A，B のどちらが正極であっても図１で与えられるとする。また，ネオンランプの電気容量，コイル以外の回路の自己インダクタンスは無視できるほど小さく，ネオンランプの明るさはネオンランプを流れる電流の大きさに比例するものとする。

Ⅰ　時刻 $t=t_0$ に回路のスイッチを入れたが，ネオンランプは点灯しなかった。

(1)　スイッチを入れた直後の V_A の大きさと符号を求めよ。

(2)　スイッチを入れてしばらくすると，回路を流れる電流は一定となった。このときコイルを流れる電流の大きさ，および V_A の大きさと符号を求めよ。

Ⅱ　回路を流れる電流が一定になった後，時刻 $t=t_1$ にスイッチを切った。その後，ネオンランプは図３のように時間 T だけ点灯した。

(1)　点灯が始まった直後にネオンランプを流れる電流の大きさを求めよ。

(2)　図１を利用して，ネオンランプの点灯が始まった直後の V_A の大きさと符号を求めよ。

(3)　ネオンランプの点灯が始まった直後，および点灯が終わる直前にコイルに生じている誘導起電力の大きさを，それぞれ求めよ。

Ⅲ　ネオンランプの点灯時間 T のおおよその値を求めたい。計算を簡単にするため，点灯中にコイルに生じている誘導起電力の大きさは一定値 V_1 であると近似する。

(1)　点灯が始まった直後にネオンランプを流れる電流の大きさを I_1 とする。点灯時間 T を，V_1，I_1，L を用いて表せ。

(2)　Ⅲ(1)の結果に V_1，I_1，L の値を代入し，点灯時間 T を有効数字１桁で求めよ。ただし，V_1 の値はⅡ(3)の結果を参考にして，適当に定めてよい。

＜ Note ＞

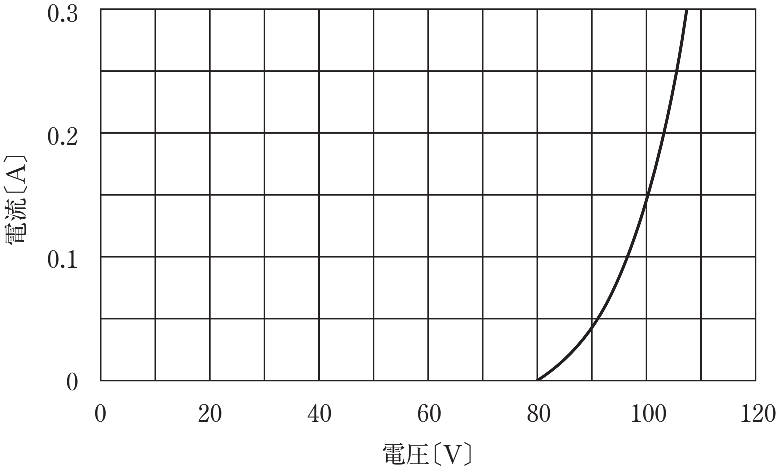

0.3
0.2
0.1
0
電流〔A〕
0
20
40
60
80
100
120
電圧〔V〕

図１

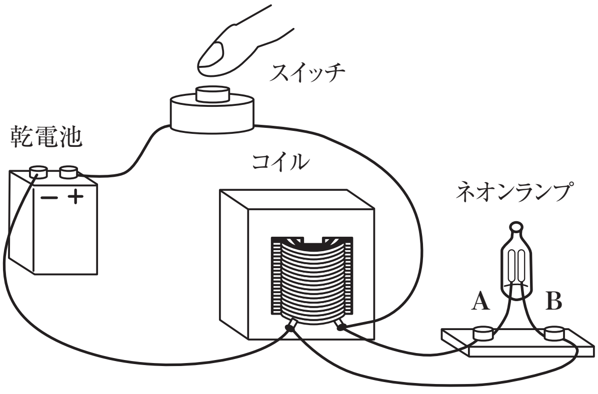

スイッチ
乾電池
コイル
ネオンランプ
A
B

図２

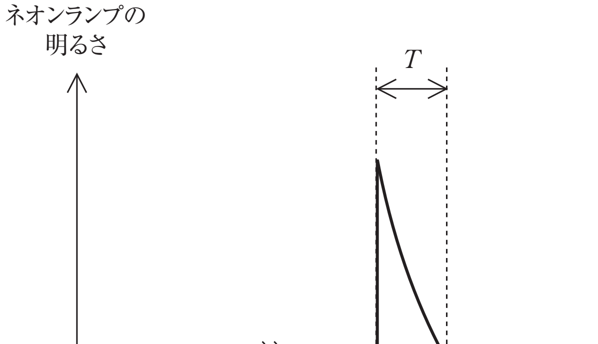

ネオンランプの
明るさ
T
O
t
t_0
t_1

図３

＜ Note ＞

第４講　解答

1

Ⅰ　(1)　$\dfrac{CV_0}{sP_0}$

(2)　$C\,(V_0+rsP_0)$

Ⅱ　(1)　$\dfrac{V_0}{sP_0}$

(2)　$\dfrac{V_0+rsP_0}{R+r}$

(3)　$R=R_0$ で最大値 sP_0V_0

Ⅲ　(1)　$V_1=\dfrac{3}{2}V_0$，$V_2=\dfrac{5}{2}V_0$

(2)　8

(3)　イ

(4)　$I=sP_0$（又は$\dfrac{V_0}{r}$），$V_1=-V_0$，$V_2=2V_0$

2

Ⅰ　(1)　$V_1=0$，$V_2=V_0$

(2)　$V_1=V_0$，$V_2=V_0$，$U=\dfrac{1}{2}CV_0^2$，$W=CV_0^2$

(3)　$V_1=V_0$，$V_2=-V_0$

(4)　$V_1=V_2=0$

Ⅱ　$V_{2N-1}=(2N-1)\,V_0$，$V_{2N}=(2N+1)\,V_0$

第４講　確認テスト

【解答】

Ⅰ　(1)　+9.0[V]　　(2)　I_0=0.20[A]，V_A=+7.0[V]

Ⅱ　(1)　0.20[A]　　(2)　V_A=−103[V]

　　(3)　点灯が始まった直後　110[V]，点灯が終わる直前　80[V]

Ⅲ　(1)　$\frac{LI_1}{V_1}$　　(2)　2×10^{-3}[s]

【解説】

Ⅰ

(1)　自己誘導により，コイルに電流は流れず，$\underline{V_A=+9.0[V]}$

(2)　コイルを流れる電流を I_0 として，

$$9.0=35I_0+10I_0 \qquad \therefore \quad I_0=\underline{0.20[A]}$$

　コイルに誘導起電力は生じず，$V_A=35\times I_0=\underline{+7.0[V]}$

Ⅱ

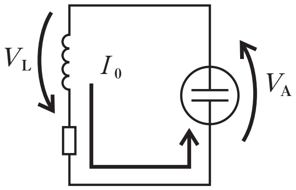
(1)　コイルの自己誘導起電力により，<u>0.20[A]</u>が保たれる。

(2)　問題中のグラフより，電流が 0.20[A] のとき，$|V_A|=103[V]$

　また，電流の向きを考慮して，$V_A=\underline{-103[V]}$

(3)　コイルの自己誘導起電力を V_L として，キルヒホッフの第２法則より，

$$V_A+V_L-35\cdot I_0=0 \qquad \therefore \quad |V_L|=\underline{110[V]}$$



　ネオンランプの点灯が終わる直前，電流 0，V_A=80[V] に近づく。よって，

$$|V_L|=|V_A|=\underline{80[V]}$$

Ⅲ

(1)　$V_1=\left|L\frac{\Delta I}{\Delta t}\right|$ より，$V_1=L\frac{I_1}{T}$　　$\therefore \quad T=\underline{\frac{LI_1}{V_1}}$

(2)　$V_1=\frac{110+80}{2}=95[V]$ として，

$$T=\frac{LI_1}{V_1}=\frac{1.0\times0.20}{95}=\underline{2\times10^{-3}[s]}$$